

# Низкопороговые полупроводниковые лазеры зеленого диапазона с накачкой электронным пучком на основе квантоворазмерных гетероструктур

М.М.Зверев, Д.В.Перегудов, И.В.Седова, С.В.Сорокин, С.В.Иванов, П.С.Копьев

*Исследованы параметры Cd(Zn)Se/ZnMgSSe-лазеров с различной конструкцией активной области, излучающих в зеленом ( $\lambda = 494 - 555$  нм) спектральном диапазоне при накачке электронным пучком с энергией 8–30 кэВ. Минимальная пороговая плотность тока (0.6–0.8 А/см<sup>2</sup> при комнатной температуре) получена для структуры, активная область которой состояла из ZnSe-квантовой ямы с дробно-монослойной CdSe-вставкой.*

**Ключевые слова:** лазер с накачкой электронным пучком, квантоворазмерная структура.

Хотя полупроводниковые лазеры с электронно-лучевой накачкой [1] известны уже более трех десятилетий, широкого распространения они не получили. Главными причинами этого являются высокий уровень пороговой плотности мощности накачки, высокие напряжения и криогенное охлаждение, нередко используемое при работе приборов. Предельные значения импульсной и средней мощности в полупроводниковых лазерах с накачкой электронным пучком были получены для структур, в которых в качестве активной среды использовался монокристалл. Существенного снижения пороговой плотности тока и рабочей энергии электронного пучка можно ожидать при использовании гетероструктур, подобных тем, что распространены в инжекционных лазерах. Для синего-зеленого диапазона спектра наиболее подходящими являются структуры на основе селенида цинка. Возможность их применения в лазерах с электронно-лучевой накачкой исследованы явно недостаточно.

Впервые об использовании эпитаксиальных пленок ZnSe на подложке ZnS для лазеров с накачкой электронным пучком сообщалось в работах [2, 3]. При поперечной накачке с энергией в электронном пучке 50 кэВ [3] была получена генерация с пороговой плотностью тока 4.5 А/см<sup>2</sup> ( $T \sim 80$  К) и 42 А/см<sup>2</sup> ( $T = 300$  К). В лазерах с поперечной накачкой на пленках ZnSe, выращенных на подложках GaAs методом синтеза из элементоорганических соединений при криогенном охлаждении (80 К), достигнута пороговая плотность тока 3.5 А/см<sup>2</sup> при энергии электронов накачки 30–45 кэВ [4]. В работе [5] сообщается о достижении режима генерации на пленках ZnSe и ZnSe/ZnSSe-сверхрешетке, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Пороговая плотность тока в этих лазерах при комнатной темпера-

туре составила 5 и 12 А/см<sup>2</sup> (35 кэВ, поперечная накачка) соответственно. Использование многослойных квантоворазмерных гетероструктур ZnCdSe/ZnSe в лазерах с продольным возбуждением сканирующим электронным пучком позволило достичь в квазинепрерывном режиме средней мощности излучения в несколько ватт при комнатной температуре [6, 7]. Порог генерации при этом составлял более 1 МВт/см<sup>2</sup> при энергии электронного пучка 30–70 кэВ. Применение миниатюрных автоэмиссионных источников электронов для накачки лазеров на квантоворазмерных структурах позволило получить генерацию при энергиях пучка около 10 кэВ в ИК диапазоне при комнатной температуре [8] и в синем-зеленом диапазоне – при криогенном охлаждении образцов [9].

За счет глубокого криогенного охлаждения ( $T = 20$  К) была достигнута предельно низкая пороговая плотность мощности накачки (450 Вт/см<sup>2</sup>) при энергии электронного пучка 5 кэВ для лазера на основе ZnCdSe-квантовой ямы [10, 11]. Использование квантоворазмерных гетероструктур на основе ZnSe с короткопериодной сверхрешеткой в качестве волновода позволило нам в лазерах синего-зеленого спектрального диапазона получить генерацию при пороговой плотности тока около 3–3.5 А/см<sup>2</sup> и энергиях электронов накачки 15–30 кэВ при комнатной температуре [12, 13].

В настоящей работе представлены результаты исследования лазерных свойств Cd(Zn)Se/ZnMgSSe-гетероструктур с различными типами активной области при накачке электронным пучком.

Структуры (Zn, Mg) (S, Se) для лазеров с электронной накачкой были выращены методом МПЭ псевдоморфно на подложках GaAs (001) при температуре 270–280 °С. Структуры содержат нижний и верхний ограничивающие слои Zn<sub>0.9</sub>Mg<sub>0.1</sub>S<sub>0.15</sub>Se<sub>0.85</sub> толщиной  $h = 0.7$  и  $0.1 - 0.2$  мкм соответственно, симметричный волновод в виде сверхрешетки из слоев 15 Å-ZnS<sub>0.14</sub>Se<sub>0.86</sub>/18 Å-ZnSe общей толщиной 0.2 мкм и активную область в виде обычной одиночной ZnCdSe-квантовой ямы (структура 1-го типа) или ZnSe-квантовой ямы шириной 10 нм с дробно-монослойной вставкой из CdSe в центре (структура 2-го типа) (рис.1). Слой CdSe номинальной толщиной в 2.5 монослоя при осаждении на поверхность ZnSe трансформируется в массив самоорганизующихся обогащенных CdSe

М.М.Зверев. ФГПУ «ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, 142092 Троицк, Московская обл.; e-mail: mzverev@triniti.ru

И.В.Седова, С.В.Сорокин, С.В.Иванов, П.С.Копьев. ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Россия, 127021 С.-Петербург, ул. Политехническая, 26

Д.В.Перегудов. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Россия, 117454 Москва, просп. Вернадского, 78

Поступила в редакцию 28 июня 2004 г.

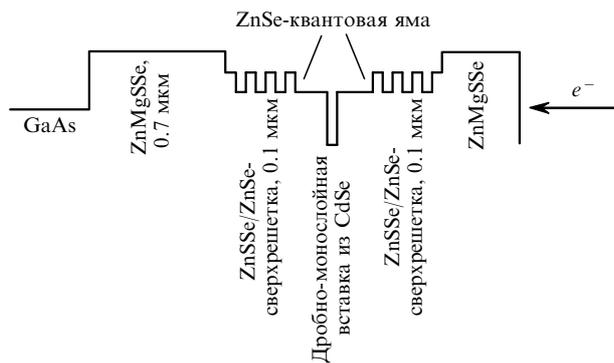


Рис. 1. Схема полупроводниковой структуры с ZnSe-квантовой ямой с дробно-монослойной вставкой из CdSe.

наноостровков – квантовых дисков, что обусловлено упругой релаксацией напряжений несоответствия параметров решетки ( $\Delta a/a \sim 7\%$ ). Ранее в лазерах с оптической накачкой на основе таких структур была получена генерация с рекордно низкой пороговой плотностью мощности накачки ( $\sim 4$  кВт/см<sup>2</sup>) [14]. Особенности выращивания активной области на основе квантовых дисков из CdSe методом МПЭ подробно описаны в [15].

Использование переменного-напряженной короткопериодной сверхрешетки позволяет увеличить электронное ограничение для дырок при оптимальном оптическом ограничении, повысить эффективность сбора носителей и стойкость всей структуры к механическим напряжениям, а также защитить активную область от проникновения и развития протяженных и точечных дефектов [16].

Все измерения проводились при комнатной температуре в поперечной геометрии возбуждения без нанесения отражающего покрытия на грани кристалла. Для накачки использовался импульсный электронный пучок, диаметр которого в плоскости образца мог регулироваться. Минимальный диаметр пучка составлял 0.3 мм. Энергия электронов могла варьироваться от 8 до 30 кэВ, длительность импульса накачки составляла  $\sim 50$  нс при частоте следования импульсов до 10 Гц. Спектры генерации регистрировались с помощью приемника на основе ПЗС-линейки, закрепленной на выходе монохроматора МДР-2. Для измерения формы светового импульса и мощности генерации использовался калиброванный коаксиальный фотоэлемент ФЭК-22. Порог генерации определялся визуально по появлению яркой светящейся точки на торце образца, что сопровождалось резким сужением диаграммы направленности излучения.

Зависимости пороговой плотности тока от энергии электронного пучка при разных длинах  $L$  резонатора лазера исследованы для различных структур.

При изменении энергии электронного пучка от 30 до 8 кэВ пороговая плотность тока вначале уменьшается, достигая минимума при энергиях 15–20 кэВ, а затем начинает расти при дальнейшем уменьшении энергии пучка (рис. 2). Минимальная пороговая плотность тока (0.6–0.8 А/см<sup>2</sup>) было получено для структуры 2-го типа ( $L = 1.35$  мм) при энергии пучка 15–18 кэВ и плотности мощности накачки около 10 кВт/см<sup>2</sup>.

Максимальная импульсная мощность генерации составила 9 Вт. При увеличении мощности накачки после достижения максимальной мощности генерации наблюдалось уменьшение последней, связанное, вероятно, с по-

вреждением полупроводниковой структуры. При выходной мощности  $\sim 0.5$  Вт ( $U = 20$  кВ) и частоте следования импульсов 10 Гц в течение 30 мин никакого изменения мощности не наблюдалось. В используемой экспериментальной установке максимальный ток электронной пушки падал с уменьшением ускоряющего напряжения, при этом выходная мощность лазера также зависела от энергии электронного пучка. При ускоряющем напряжении  $U = 8$  кВ максимальная импульсная мощность лазерного излучения составила 0.2 Вт.

Максимальная эффективность генерации, определяемая как отношение мощности лазерного излучения, выходящего через одну грань, к мощности электронного пучка накачки, на всех структурах не превышала 1.6 % и была достигнута при энергиях электронного пучка 17–21 кэВ. При этом значительная часть мощности электронного пучка терялась в подложке, т. к. глубина проникновения электронного пучка в кристалл селенида цинка при таких энергиях составляет около 1–1.5 мкм [17], что значительно превышает расстояние от активной области до поверхности образца в использованных нами структурах (0.2 мкм). Для более эффективного использования энергии накачки геометрия структуры должна быть точнее согласована с энергией электронного пучка. При ее уменьшении вследствие уменьшения глубины возбужденной области возрастает роль потерь энергии накачки во внешних, обращенных к поверхности, слоях структуры. При уменьшении толщины  $h$  внешней части структуры с 0.2 до 0.1 мкм энергия электронного пучка, при которой наблюдается минимальная пороговая плотность тока, снижается с 18–20 до 15–16 кэВ. Таким образом, для увеличения эффективности генерации следует использовать более толстые структуры с меньшей толщиной поверхностных слоев.

Длина волны генерации для разных структур находится в диапазоне 494–555 нм при ширине линии 2–3 нм (рис. 3). Для каждой структуры длина волны в максимуме линии излучения варьируется в пределах нескольких нанометров в зависимости от энергии электронного пучка и длины резонатора.

Диаграмма направленности излучения сильно асимметричная. В плоскости, проходящей через ось электронного пучка и ось лазерного резонатора, расходимость превышала 30°. В плоскости полупроводниковой структуры картина распределения поля в дальней зоне была весьма сложной и состояла из большого количества уз-

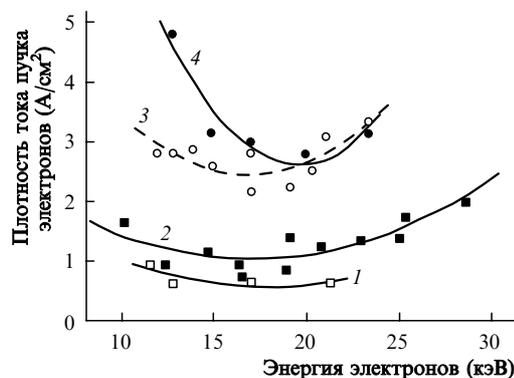


Рис. 2. Зависимости пороговой плотности тока от энергии электронного пучка для полупроводниковых структур 2-го (1, 2, 4) и 1-го (3) типов при  $h = 0.1$  (1, 2, 3) и 0.2 мкм (4) и  $L = 1.35$  (1), 0.95 (2), 0.5 (3) и 0.62 мм (4).

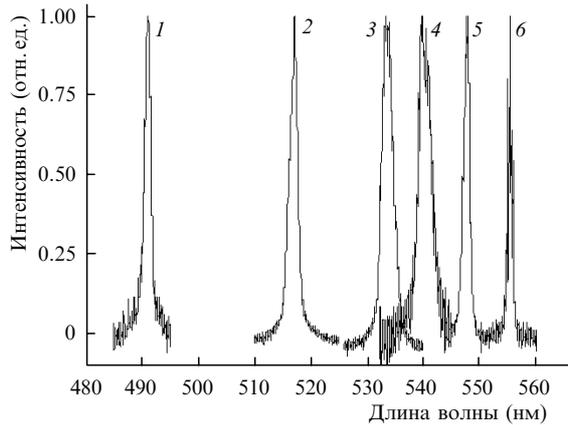


Рис.3. Спектры генерации лазеров на полупроводниковых структурах 1-го (1, 2, 6) и 2-го (3, 4, 5) типов.

ких пиков. На большинстве образцов среднее значение полуширины диаграммы направленности было равно  $2-5^\circ$  (в зависимости от параметров резонатора и накачки).

Таким образом, использование квантоворазмерных гетероструктур на основе ZnSe со встроенной в волновод сверхрешеткой позволило получить генерацию при накачке электронным пучком с энергией электронов 8–30 кэВ в сине-зеленом диапазоне спектра при комнатной температуре. Минимальная пороговая плотность тока пучка ( $0.6-0.8 \text{ А/см}^2$ ) наблюдалась для структуры с дробно-многослойной вставкой из CdSe. Полученные в экспериментах низкие пороговые плотности тока электронного пучка при умеренных ускоряющих напряжениях и комнатной температуре открывают возможности создания компактных отпаянных приборов – лазеров с электронно-лучевой накачкой.

Работа выполнена при финансовой поддержке федеральной программы «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» (проект 208.05.01.044), гранта Минобразования

№ E02-3.1-209 и проекта INTAS 03-51-5019. С.В.Иванов благодарит также Фонд содействия отечественной науке.

1. Богданкевич О.В. *Квантовая электроника*, **21** (12), 1113 (1994).
2. Богданкевич О.В., Лаврушин Б.М., Матвеев О.В., Певцов В.Ф., Халимон М.М. *Квантовая электроника*, **3** (3), 612 (1976).
3. Петухов В.С., Печенов А.Н., Таленский О.Н., Халимон М.М. *Квантовая электроника*, **5**, 682 (1978).
4. Богданкевич О.В., Журавлев Л.А., Коновалов А.Д. и др. *Квантовая электроника*, **10** (5) 1007 (1983).
5. Cammack D.A., Dalby R.J., Cornelisson I.J., Khurgin J. *J. Appl. Phys.*, **62**, 3071 (1987).
6. Basov N.G., Dianov E.M., Kozlovsky V.I., Krysa A.B., Nasibov A.S., Popov Yu.M., Prokhorov A.M., Trubenko P.A., Shcherbakov E.A. *Laser Phys.*, **6** (3), 608 (1996).
7. Басов Н.Г., Дианов Е.М., Козловский В.И., Крыса А.Б., Насибов А.С., Попов Ю.М., Прохоров А.М., Трубенко П.А., Щербаков Е.А. *Квантовая электроника*, **22** (8), 756 (1995).
8. Molva E., Accomo R., Labrunie G., Cibert J., Bodin C., Dang L.S., Fenillet G. *Appl. Phys.Lett.*, **62**, 796 (1993).
9. Herve D., Accomo R., Molva E., Vanzetti L., Paggel J.J., Sorba L., Francisci A. *Appl. Phys.Lett.*, **67**, 2144 (1995).
10. Potts J.E., Smith T.L., Cheng H. *Appl. Phys. Lett.*, **50** (1), 7 (1987).
11. Trager-Cowan C., Bagnall D.M., McGow F., McCallum W., O'Donnell K.P., Smith P.C., Wright P.J., Cockayne B., Prior K.A., Mullins J.T., Horsburgh G., Cavenett B.C. *J. Cryst. Growth*, **159**, 618 (1996).
12. Zverev M.M., Sorokin S.V., Sedova I.V., Peregoudov D.V., Ivanov S.V., Kop'ev P.S. *Phys. Stat. Sol. (b)*, **229** (2), 1025 (2002).
13. Зверев М.М., Иванов С.В., Перегудов Д.В., Сорокин С.В., Седова И.В., Копьев П.С. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **9**, 22 (2002).
14. Ivanov S.V., Toropov A.A., Sorokin S.V., Shubina T.V., Lebedev A.V., Sitnikova A.V., Kop'ev P.S., Alferov Z.I. *J. Cryst. Growth*, **201/202**, 942 (1999).
15. Ivanov S.V., Toropov A.A., Shubina T.V., Sorokin S.V., Lebedev A.V., Kop'ev P.S., Posina G.R., Bergman J.P., Monemar B. *J. Appl. Phys.*, **83**, 3168 (1998).
16. Ivanov S.V., Toropov A.A., Sorokin S.V., Shubina T.V., Lebedev A.V., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Lugauer H.-J., Reuscher G., Keim M., Fischer F., Waag A., Landwehr G. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 2104 (1998).
17. Trager-Cowan C., Yang F., O'Donnell K.P. *Adv. Mater. Optics and Electronics*, **3**, 295 (1994).